GUÍA PARA LA ASIGNATURA DE
INSTALACIONES Y SERVICIOS TÉCNICOS
(2)

MÁQUINAS Y SISTEMAS FRIGORÍFICOS

por

FRANCISCO GALLEGO PUERTAS
PILAR OTEIZA SANJOSÉ



CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-84-04

GUÍA PARA LA ASIGNATURA DE
INSTALACIONES Y SERVICIOS TÉCNICOS
(2)

MÁQUINAS Y SISTEMAS FRIGORÍFICOS

por

FRANCISCO GALLEGO PUERTAS
PILAR OTEIZA SANJOSÉ

CUADERNOS
DEL INSTITUTO
JUAN DE HERRERA
DE LA *ESCUELA DE*
ARQUITECTURA
DE MADRID

2-84-04

C U A D E R N O S
D E L   I N S T I T U T O
J U A N   D E   H E R R E R A

NUMERACIÓN

2 Área
51 Autor
09 Ordinal de cuaderno (del autor)

TEMAS

1 ESTRUCTURAS
2 CONSTRUCCIÓN
3 FÍSICA Y MATEMÁTICAS
4 TEORÍA
5 GEOMETRÍA Y DIBUJO
6 PROYECTOS
7 URBANISMO
8 RESTAURACIÓN
0 VARIOS

Guía para la asignatura de Instalaciones y Servicios Técnicos (2).
Máquinas y sistemas frigoríficos.

Instituto Juan de Herrera.
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid.
Gestión y portada: Almudena Gil Sancho.
CUADERNO 391.01 / 2-84-04
ISBN-13 (obra completa): 978-84-9728-358-8
ISBN-13: 978-84-9728-446-2
Depósito Legal: M-1701-2013

ÍNDICE

PROEMIO

Las máquinas frigoríficas son hoy prácticamente imprescindibles para conseguir las condiciones de confort y habitabilidad normativamente indispensables en los edificios. Habitualmente se estudian de forma genérica, sin tener en cuenta el uso específico que pueden tener y, en consecuencia, sin estimar el *riesgo personal y el riesgo medioambiental que tienen asociado.*

Por esta razón la UNE- EN 378: 2011 define y establece el alcance de los *sistemas frigoríficos de la edificación* -en los que incluye las máquinas frigoríficas- y exige que estos *sistemas frigoríficos* cumplan condiciones que eviten: daño de personas, destrucción del ozono atmosférico y/o calentamiento global terrestre.

Es evidente que *el riesgo personal y el riesgo medioambiental* -que las instalaciones de los edificios no industriales conllevan- implican responsabilidades profesionales y éticas que los profesionales de la arquitectura no pueden evadir; y, si es cierto que el cálculo de los sistemas frigoríficos exige un importante grado de especialización, no es menos cierto que es impensable abordar un proyecto de arquitectura sin conocer: tanto qué es, y cómo funciona una máquina, como las posibilidades y necesidades constructivas que los sistemas frigoríficos imponen al edificio.

1. INTRODUCCIÓN A LAS MÁQUINAS FRIGORÍFICAS

La naturaleza no sabe "producir" frío.

Los procesos naturales suceden de forma que las transferencias de energía se realizan en el sentido de los potenciales decrecientes; espontáneamente, el calor, energía en tránsito, va de los sistemas con mayor temperatura a los de menor temperatura; y este proceso es *naturalmente* irreversible.

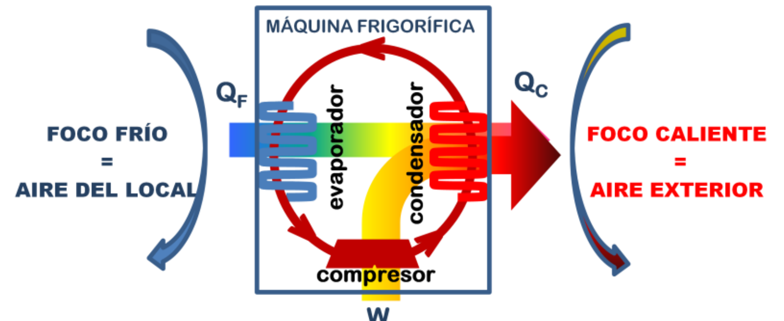
La necesidad de disponer de entornos donde las personas experimenten bienestar térmico, ha impulsado el desarrollo de dispositivos que nos permiten "fabricar ambientes" en el interior de los edificios, en los que las temperaturas son continuamente menores que en el exterior. Estos dispositivos, *máquinas frigoríficas,* son capaces de *transportar* calor de un sistema *¡a otro más caliente!* consumiendo *necesariamente* trabajo (o calor) aportado desde el exterior del sistema.

Se fundamentan en la propiedad física del cambio de estado de la materia: la evaporación de un líquido o la dilatación de un gas, *absorbe calor*, y la condensación de un gas, *cede calor*.

Así, las **MÁQUINAS FRIGORÍFICAS** *tomando calor o trabajo del exterior* mueven y provocan cíclicamente sucesivos cambios de fase en un *fluido frigorígeno o refrigerante;* estos cambios de fase se aprovechan para *extraer calor de un foco frío, transportarlo y entregárselo a un foco más caliente*. En su disposición más simple, los focos serán:

- el *aire ambiente,* de un recinto, *foco frio,* del que continuamente retiramos calor.
- el *aire exterior*, atmosférico, *foco caliente* al que continuamente añadimos calor.

El balance de energía transferida entre los focos, durante un ciclo, será: $\mathbf{W + Q_F = Q_C}$



- $\mathbf{Q_F}$**,** calor cedido por el foco frío
- $\mathbf{Q_C}$, calor ganado por el foco caliente
- **W,** trabajo realizado por el compresor, que se puede expresar en su equivalente en calor: $\mathbf{Q_M}$

Durante un ciclo completo de la máquina frigorífica, de acuerdo con la Primera Ley de la Termodinámica[1]*,* el fluido varía su energía según: $\Delta U = \Delta Q - W$ y como *-despreciando las pérdidas por fricción-* durante un ciclo, los estados inicial y final son iguales, sucederá que: $\Delta U = 0$ luego $\Delta Q - W = 0$ y:

$$\mathbf{W + Q_F = Q_C \quad o \quad Q_M + Q_F = Q_C}$$

[1] En el **Anexo A** se exponen, resumidamente, los conceptos termodinámicos más útiles para la comprensión de las máquinas frigoríficas: sistemas, ciclos y diagramas…que es recomendable revisar antes de continuar.

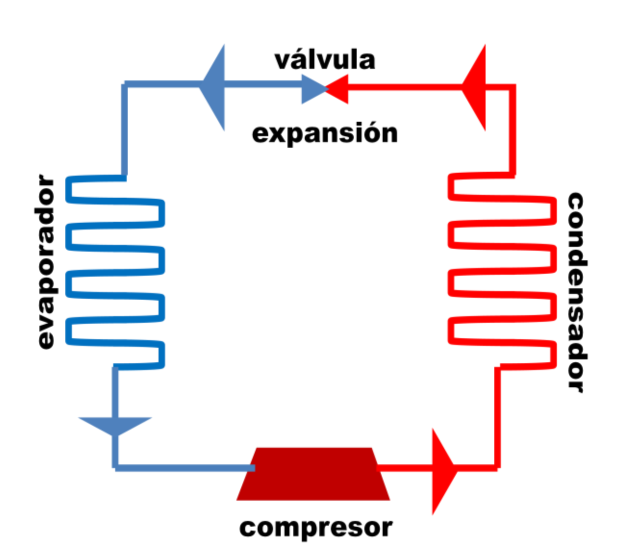
2. CLASES DE MÁQUINAS FRIGORÍFICAS

Las máquinas frigoríficas se clasifican según el tipo de energía que, durante el ciclo, se aporta -*desde el exterior*- al fluido frigorígeno:

- de compresión *(trabajo)*
- de absorción *(calor)*
- de adsorción *(calor)*
- de eyección *(calor)*

En edificación, para climatización, se utilizan generalmente las máquinas a ciclo de compresión.

Las **máquinas frigoríficas a compresión** están básicamente compuestas por: *compresor, condensador, válvula de expansión y evaporador.* Si su única función es enfriar: el refrigerante fluye siempre en la misma dirección y los intercambiadores, invariablemente realizan la misma función: uno siempre evapora líquido y el otro siempre condensa gas:



- en el condensador el gas, caliente y a alta temperatura, que llega del compresor, se hace líquido al ceder calor al fluido que es forzado a circular por su exterior,

- en el evaporador el líquido a alta presión se expande y vaporiza tomando calor del fluido que es forzado a circular por su exterior.

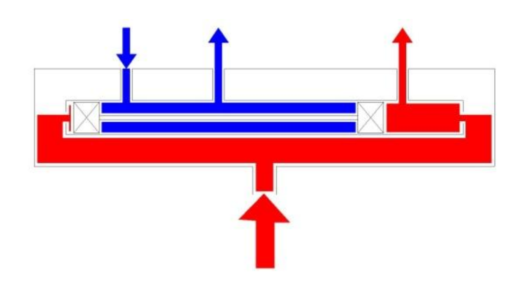
¡¡No es necesario que los fluidos que circulan por el exterior de los intercambiadores sean idénticos!!

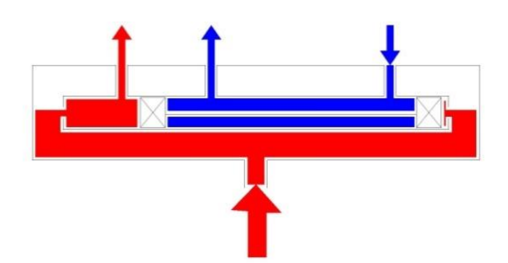
Ahora bien, si invertimos la dirección de flujo en la máquina, haciendo que el intercambiador que antes evaporaba ahora condense, y que ahora evapore el que antes condensaba, la máquina estará ahora trabajando *en ciclo inverso,* y se dice que trabaja como *bomba de calor.* Así, con una sola máquina, es posible calentar y enfriar, *alternativamente*, el mismo recinto.



Notablemente, el cambio de modo de funcionamiento -de modo refrigeración a modo bomba de calor, o viceversa- se obtiene sin más acción que un cambio de posición, *en el interior,* de una válvula de cuatro vías (a la izquierda)

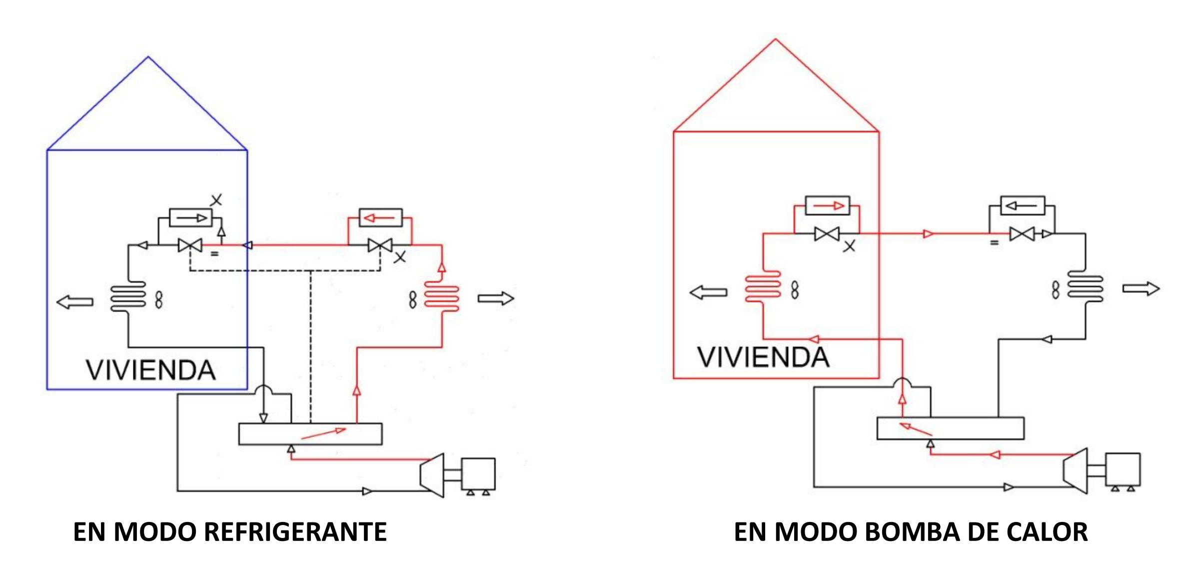
válvula de 4 vías en modo refrigerante **válvula de 4 vías en modo bomba de calor**





Debemos tener presente que la máquina frigorífica *siempre* trabaja tomando calor del foco frío y pasándolo al foco caliente; *también* cuando lo hace en modo bomba de calor:

MÁQUINA FRIGORÍFICA A COMPRESIÓN



EN MODO REFRIGERANTE **EN MODO BOMBA DE CALOR**

- En el *modo refrigerante* el evaporador estará en el interior del recinto de donde extraerá calor que volcará en el exterior donde se encuentra el condensador.

- En el *modo bomba de calor*, sin desplazar ningún elemento, con la simple acción de una válvula de cuatro vías, hacemos que el intercambiador situado en el interior se comporte como el condensador y como evaporador el situado en el exterior… y, de nuevo, la máquina estará tomando calor del *foco frío*, el exterior, para cederlo al interior, *foco caliente.*

En conclusión*, las máquinas frigoríficas son,* en su función*, un sistema termodinámico cerrado* que interactúa continuamente con:

- *el ambiente del recinto habitable cerrado del que se extrae o al que se cede calor*
- *el ambiente exterior* considerado como una reserva o sumidero, inagotable, de energía.

Si hiciésemos funcionar una máquina frigorífica en el interior de un local cerrado, el único cambio producido sería un aumento del calor en el ambiente; proporcional a la energía eléctrica consumida en el compresor, en este caso: el balance de energía transportada

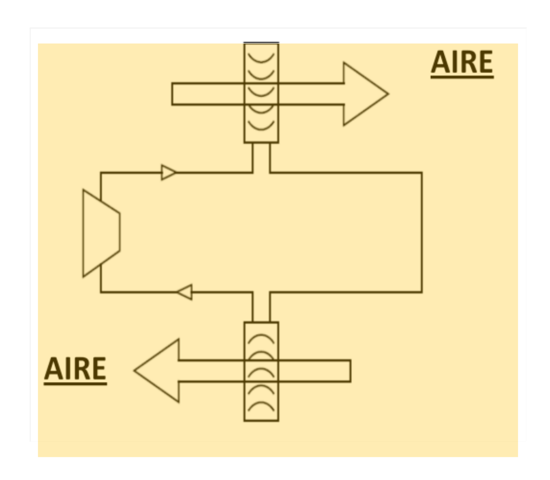
sería nulo (…¡¡habría un solo foco!!) y el ambiente del recinto se enfriaría en casi la misma medida que es calentado.

Una máquina frigorífica exige siempre **dos focos** con diferente temperatura para:

- *tomar energía del foco frío* y *transportarla*
- *hasta el foco caliente* al que entrega, además, la energía empleada en comprimir el gas

Se utilizan los más variados criterios de clasificación; desde por su aspecto visual: *compactas* o *partidas,* hasta por su ubicación: *de cubierta (roof-top), de ventana…* Creemos que el criterio más objetivo es clasificar las máquinas de forma intrínseca, de acuerdo a su desempeño:

- *primero:* identificando el fluido que ***cede*** calor al refrigerante para que se evapore,
- *segundo*: identificando el fluido que ***absorbe o retira*** calor del refrigerante para que se condense.



- **Es muy importante entender que nunca es posible considerar que condensador y evaporador estén en un mismo ambiente:** ***siempre, uno de ellos estará en interior del recinto que se climatiza y, el otro, en su exterior.***

Así las máquinas frigoríficas a compresión se denominan:

AIRE - AIRE

AIRE – AGUA

AGUA-AIRE | **AGUA - AGUA**

AIRE

AGUA

AGUA

AGUA

Actualmente, también: **AIRE- TIERRA** o **TIERRA-AIRE;** obviamente, ***nunca*, TIERRA-TIERRA.**

3. PRODUCCIÓN DE ENERGÍA EN INSTALACIONES DE CLIMATIZACIÓN

Las instalaciones de climatización son sistemas que, prioritariamente, deben de abastecer de aire salubre a los recintos interiores de los edificios; y, además, les aportan o retiran energía para mantenerlos en condiciones de bienestar térmico. Se denominan según el fluido que entra, como caloportador, en los locales: TODO AIRE, TODO AGUA Y TODO REFRIGERANTE; en estos dos últimos sistemas se debe disponer de una instalación adicional, específica, para ventilación

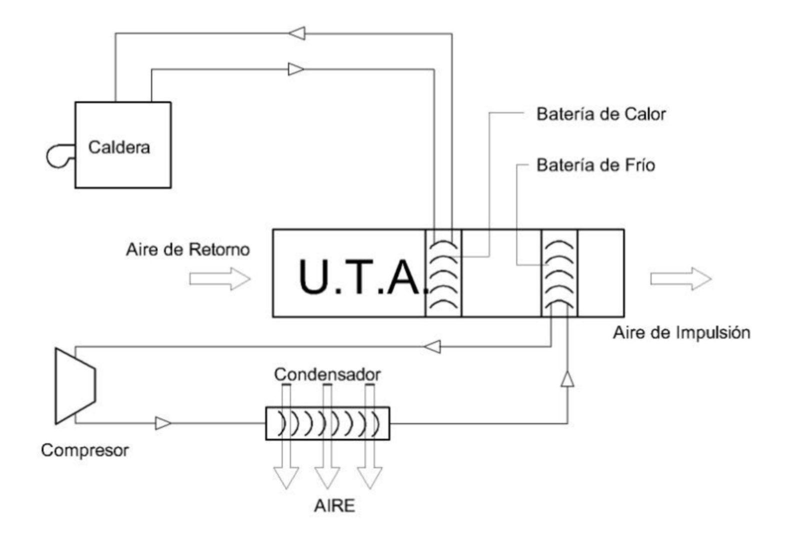
Las máquinas frigoríficas son los dispositivos cuya misión es **retirar** energía *(enfriar)* de los locales, aunque, como se ha dicho, su operación en modo bomba de calor permite, alternativamente, **aportar** energía (calefactar). En cualquiera de los modos lo hará *directa o indirectamente:*

- Directamente: si es el fluido refrigerante el que entra en el local, *como líquido o como gas*, y directamente *se evapora o condensa* en un dispositivo emisor interior,
- Indirectamente: si su función es enfriar el fluido caloportador, *agua y/o aire*, que es el que entra en los locales y suministra energía a los emisores.

Cuando lo hacen *indirectamente* requieren, *obligatoriamente* dispositivos adicionales para impulsar el fluido caloportador a los recintos, tales como:

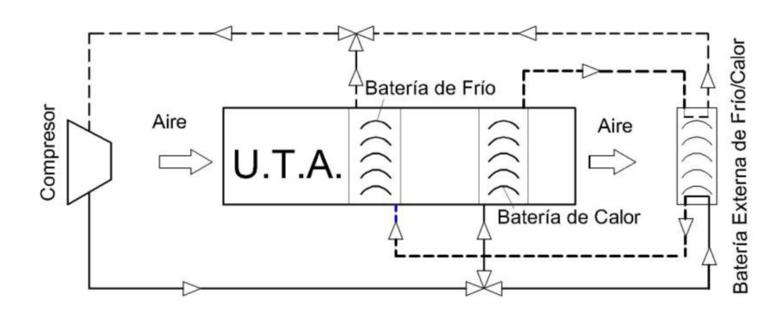
- una **UTA** en la instalación TODO AIRE; para acondicionar higrotérmicamente el aire.
- **UTA, bombas, intercambiadores de calor, torre de enfriamiento** en los sistemas que utilicen agua para hacer llegar energía a los recintos.

Para visualizar, esquemáticamente, las diferentes alternativas de composición del bloque de producción de energía tomamos como ejemplo el sistema TODO AIRE. En los esquemas a continuación se incluyen *las calderas* como dispositivo de producción de energía y UTA, bombas,…como equipos auxiliares complementarios para la climatización de los locales.



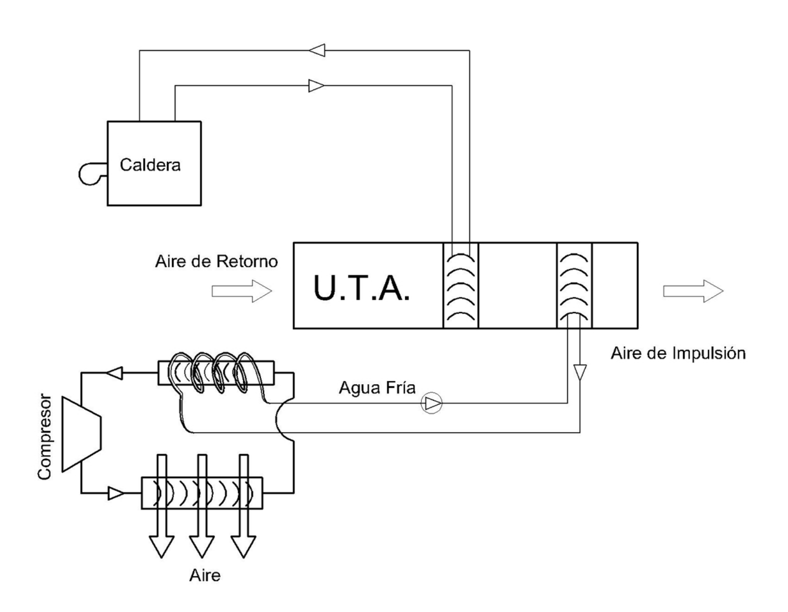
SIST. CLIMATIZACIÓN TODO AIRE

- ***UTA –climatizadora-***
- ***Caldera***
- ***M. frigorífica AIRE-AIRE***



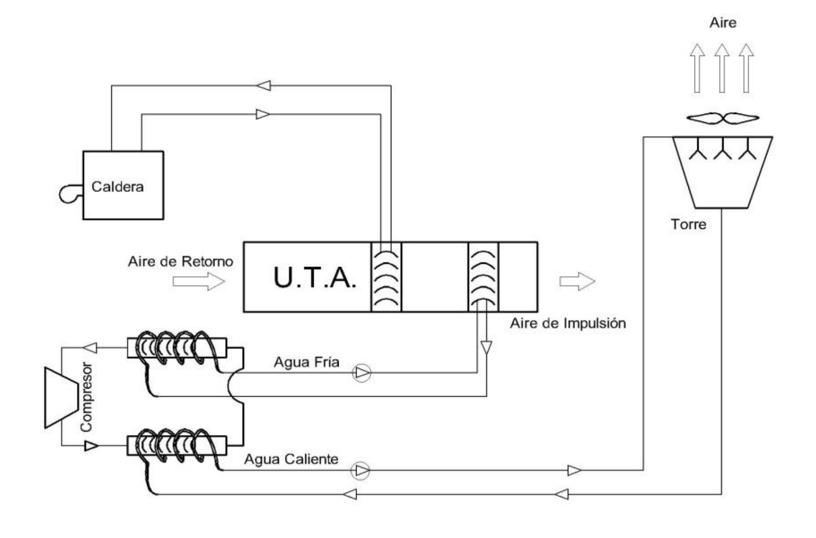
SIST. CLIMATIZACIÓN TODO AIRE

- ***UTA –climatizadora-***
- ***M. frigorífica AIRE-AIRE operando en modo BOMBA DE CALOR***



SIST. CLIMATIZACIÓN TODO AIRE

- ***UTA –climatizadora-***
- ***Caldera***
- ***M. frigorífica AGUA-AIRE***



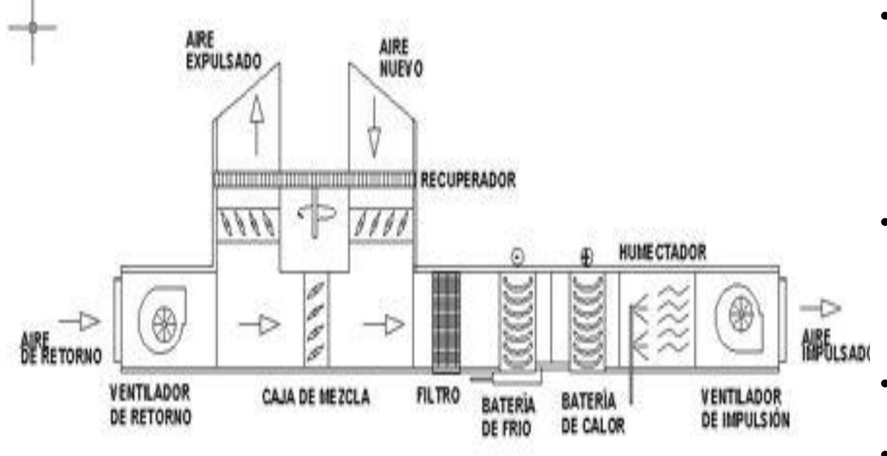
SIST. CLIMATIZACIÓN TODO AIRE

- ***UTA –climatizadora-***
- ***Caldera***
- ***M. frigorífica AGUA-AGUA***
- ***Torre de refrigeración***

3.1 Unidad de tratamiento de aire, U.T.A.

En los sistemas TODO AIRE, en los que el fluido caloportador es el aire húmedo, la energía producida en la caldera y/o máquina frigorífica es transferida al aire que se impulsa a los locales en una Unidad de Climatización genéricamente llamada U.T.A.

Esta Unidad controla y regula la aportación de aire de ventilación que -mezclado con parte del aire de retorno de los locales- impulsa a los locales. En el paso por la unidad, el aire es: filtrado, calentado/enfriado y si fuese necesario, humedecido. Consta de:



- **Recuperador,** transfiere la energía que lleva el aire expulsado al aire introducido para ventilar.
- **Caja de mezcla,** regula la proporción de aire expulsado, introducido e impulsado.
- **Filtros** de carbono, celulosa,…
- **Baterías,** tubos aleteados con finas lamas que aumentan la superficie de transferencia.

  Humectadores, que controlan la humedad relativa y producen enfriamiento entálpico.

- **Ventiladores,** se disponen tanto para forzar la impulsión como el retorno, aunque en razón del espacio disponible pueden variar en número y tipo (centrífugo en medianas y grandes instalaciones).

4. POTENCIA Y RENDIMIENTO DE LAS MÁQUINAS FRIGORÍFICAS

Para el cálculo, construcción y selección de las máquinas frigoríficas es indispensable determinar la potencia generada, transferida… ***útil,*** en cada uno de los elementos que las componen: *compresor, intercambiadores y válvula de expansión*. El cálculo de cada una de estas potencias se puede realizar aplicando los principios de la termodinámica al caudal másico de fluido refrigerante[2]; así:

- En el **evaporador,** donde se produce una expansión isobárica (sin trabajo) con el exterior y despreciando las variaciones de energía mecánica y pérdidas por rozamiento del fluido:

$$\Phi = Q \cdot \rho \cdot \Delta h_{evaporación} \; ; \; \Phi = Q \cdot \rho \cdot \Delta s_e \cdot T_e$$

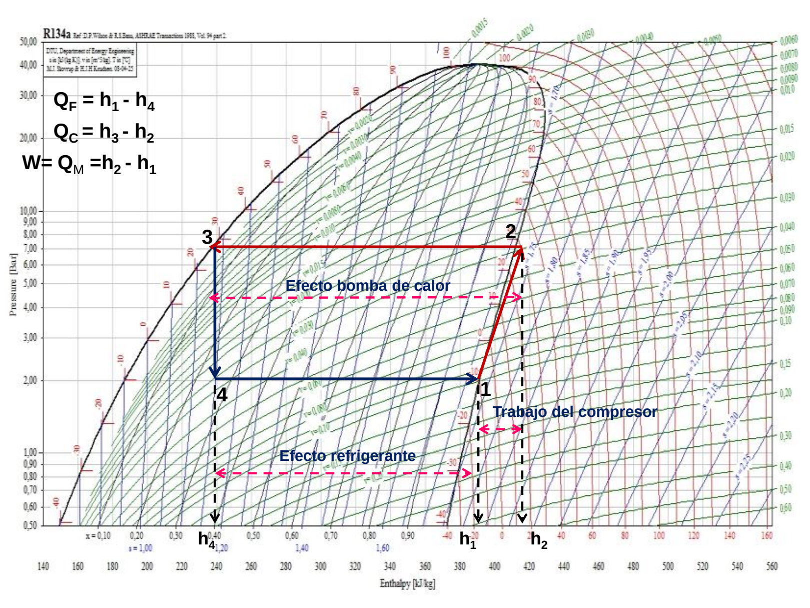
- En el **condensador,** donde se licua el gas isobáricamente (sin trabajo) con el exterior y despreciando las variaciones de energía mecánica y pérdidas por rozamiento del fluido:

$$\Phi = Q \cdot \rho \cdot \Delta h_{condensación} \; ; \; \Phi = Q \cdot \rho \cdot \Delta s_c \cdot T_c$$

- En el **compresor**, que comprime isoentrópicamente[3] el gas consumiendo energía eléctrica (al comprimir el gas se aumenta su energía interna pero también su temperatura sensible):

$$-W_c = \Delta h_c \Rightarrow \Phi = Q \cdot \rho \cdot \Delta h_{compresión}$$

- En la **válvula de expansión**, su única función es mantener la diferencia de presión entre condensador y evaporador. Se trata de un pequeñísimo orificio por el que pasa el refrigerante sin realizar trabajo, ni rozamiento; el proceso aquí se puede considerar estrictamente isoentálpico: $\Delta h_v = 0 \Rightarrow \Phi = 0$



Los cálculos anteriores carecen de complejidad si se representa el ciclo termodinámico del refrigerante en su correspondiente diagrama de fase (o de Mollier); ya que en estos diagramas se pueden hacer lecturas de ***h*** y ***s.***

[2] $\Delta U = \Delta Q - W \; ; \; \Delta Q = \Delta s \cdot T$

[3] **Isoentrópica: adiabática + isoentálpica aunque con aumento de calor sensible.**

El rendimiento ***total, η,*** de la máquina es la relación entre la energía ***útil total*** y la ***energía consumida en el compresor y los ventiladores***: $\eta = Q_C - Q_F / W_T$; y debe de ser: $\eta \leq 1$.
Si $\eta \geq 1$; durante el ciclo: $Q_C - Q_F / W_T \geq 1 \Rightarrow$ **¡¡**$Q_C \geq Q_F + W_T$**!!** ¡y habríamos obtenido más energía que la suma de la consumida y transportada! Estaríamos generando energía a partir de… *¡nada!* [4]

5. EFICIENCIA EN LAS MÁQUINAS FRIGORÍFICAS

En edificación, sin embargo, el rendimiento que interesa conocer y especificar no es el rendimiento de cada uno de los elementos componentes; *ni tampoco el rendimiento agregado o total de la máquina en su conjunto*: nos importa la relación entre lo que queremos conseguir *–calor que retiramos o aportamos, alternativamente, a un recinto habitable*- y la energía que empleamos en hacerlo *-trabajo efectuado por el compresor, ventiladores y otros*- .

Esencialmente, nuestro interés está en conocer el rendimiento de uno de los elementos de la máquina[5]: ***el intercambiador que está dentro del recinto***. O lo que es lo mismo: conocer la relación existente entre la energía útil transferida en este intercambiador y la energía total absorbida por la máquina.

Y, ahora sí, la eficiencia en el intercambiador que está dentro del recinto*:* ***COP o EER*** puede ser, y es ***≥ 1;*** *porque nos informan, única, exclusiva y suficientemente, del rendimiento (eficiencia) de una parte de la máquina* (nunca del comportamiento de la máquina en su conjunto).

La relación entre energías descrita es, conceptualmente, un rendimiento y será diferente según la máquina trabaje en ciclo refrigerante o en ciclo bomba de calor:

5.1. Coeficientes de Eficiencia Energética: EER y COP

- **EER,** eficiencia en ciclo refrigerante, con el **evaporador enfriando el recinto**: se calcula como el cociente entre la *potencia frigorífica útil transferida en el evaporador* y la *potencia eléctrica total consumida por la máquina,* para unas condiciones de funcionamiento determinadas.
    - $EER = Q_F / W_M$ **EER, *energy efficiency ratio* ≡ coef. de eficiencia en evaporación,** CEE_e

      Q_F, *potencia frigorífica total útil* en el evaporador es el *calor instantáneo* que toma el refrigerante del aire ambiente interior -donde está instalado- y ***transporta*** hasta el condensador donde será cedido -expulsado- al aire ambiente exterior.

---

[4] **En el anexo B se incluyen diagramas de algunos de los refrigerantes más comunes.**
[5] **Utilizando como ejemplo una máquina frigorífica aire-aire.**

- **COP**, eficiencia en ciclo bomba de calor, con el **condensador calentando el recinto:** se calcula como el cociente entre la *potencia calorífica útil transferida en el condensador* y la *potencia eléctrica total consumida por la máquina* para unas condiciones de funcionamiento determinadas.

   - **COP = Q_C / W_M** **COP, *coefficient of performance* ≡ coef. de eficiencia en condensación CEE$_C$**

     Q_C, *potencia calorífica total útil* en el condensador es el *calor instantáneo* que el refrigerante cede al ambiente interior (transportado desde el evaporador que ahora está en el exterior) ***más*** la energía instantánea que el compresor añade al vapor frío que recoge del evaporador e impulsa al condensador.

En ambos casos, son relaciones que involucran *la energía térmica instantánea cedida/absorbida* en un **intercambiador de calor** y *la energía, de tipo convencional, proveniente de compresores, bombas, ventiladores o sistemas de apoyo, consumida*.

Aunque ya veíamos como es posible utilizar los diagramas de Mollier para conocer el valor de las entalpías específicas de los refrigerantes y, con ellas, calcular la potencia de transferencia térmica en cada uno de los elementos de las máquinas, podemos, también, calcular de una manera más simple y sencilla los valores límite de eficiencia, ***EER*** *y* ***COP***, en función de las temperaturas absolutas de cambio de fase:

$$\mathbf{EER} = \frac{\mathbf{Q_F}}{\mathbf{W}} = \frac{\mathbf{Q_F}}{\mathbf{Q_C - Q_F}} = \frac{\mathbf{T_F}}{\mathbf{T_C - T_F}}$$

$$\mathbf{COP} = \frac{\mathbf{Q_C}}{\mathbf{W}} = \frac{\mathbf{Q_C}}{\mathbf{Q_C - Q_F}} = \frac{\mathbf{T_C}}{\mathbf{T_C - T_F}}$$

Insistiendo en que, en el *condensador*, para calcular el **COP, la energía útil total** es la suma de:

- Una energía *térmica producida* por el compresor; mensurable por el incremento de entalpía que adquiere un fluido al ser comprimido.
- Y una energía *térmica transportada* desde el foco a menor temperatura hasta el de mayor temperatura.

Mientras que en el *evaporador* la energía transferida es únicamente la tomada del ambiente.

Es de interés reparar en que la relación entre ambas eficiencias se puede expresar:

$$\mathbf{COP} = \frac{\mathbf{Q_c}}{\mathbf{W}} = \frac{\mathbf{W + Q_F}}{\mathbf{W}} = \mathbf{1} + \frac{\mathbf{Q_F}}{\mathbf{W}} = \mathbf{1 + EER}$$ [6]

¡¡La eficiencia en modo calefacción es mayor que en modo enfriamiento!!

---

[6] **Se acepta aquí *la licencia* normativa de calcular los rendimientos con energías instantáneas (potencias). Aunque ya, en vías de corrección: borrador EN 14825 donde se propone SCOP (COP estacional) para evaluar la energía consumida en disposición de servicio en modo bomba de calor.**

6. CONCLUSIONES SOBRE LAS MÁQUINAS FRIGORÍFICAS A COMPRESIÓN

- Están constituidas básicamente por: un compresor, dos intercambiadores de calor (condensador y evaporador) y una válvula de expansión.
- Condensador y evaporador no deben emplazarse en el interior del mismo recinto, y el compresor debe siempre situarse en el exterior o espacio no habitable.
- Funcionan cíclicamente *aportando y transportando* energía: *aportan energía* por un compresor que *consume trabajo* y *transportan energía,* gratuita, de un recinto a su exterior o viceversa.
- El sentido de flujo del refrigerante puede ser invertido por una simple válvula de cuatro vías cambiando la función de los intercambiadores: haciéndoles pasar de evaporador a condensador o viceversa.
- Si el intercambiador que está en el interior del recinto realiza la evaporación: decimos que la máquina funciona en ciclo frigorífico; si realiza la condensación, la máquina, funciona en modo bomba de calor.
- El rendimiento conjunto de la máquina frigorífica nunca puede ser > 1. Sin embargo, en edificación no nos interesa el rendimiento de la máquina sino el rendimiento de uno de sus componentes -condensador o evaporador- según cuál sirva en el interior del recinto.
- Estos rendimientos se denominan: **EER**, para evaporador en el interior y **COP**, cuando es el condensador el que está en el interior; se calculan relacionando la energía transferida, en ellos, respecto al consumo de energía total de la máquina (compresor, bombas y ventiladores) y en éstos *sí puede ser su valor mayor que 1.*

En consecuencia, para la evaluación y elección de una máquina frigorífica es determinante su **EER y/o COP** y, será especialmente relevante tener en cuenta que:

- La información disponible sobre el **EER y/o COP**, dadas por los fabricantes, está referida a *potencias* (consumos instantáneos) y no a *energías* (consumos totales) Esta forma instantánea de evaluar el rendimiento, aunque acorde con el reglamento, oculta el rendimiento real de las máquinas.
- Para un cálculo correcto -de **COP y EER**- sería necesario estimar las condiciones de trabajo de la máquina frigorífica a lo largo de una temporada teniendo en cuenta el consumo por disponibilidad de servicio y calcular los rendimientos estacionales en función de la energía total consumida durante la estación[7].
- Respecto a las máquinas de compresión aire/aire, el resto de las máquinas -tanto las de compresión (aire/agua…) como las de absorción y adsorción- tienen un muy apreciable consumo por disposición de servicio.

[7] **Ya en vías de corrección: el borrador EN 14825 propone un coeficiente SCOP (COP estacional) para evaluar el rendimiento de las máquinas frigoríficas en modo bomba de calor.**

7. CICLOS DE ABSORCIÓN, ADSORCIÓN Y EYECCIÓN

Son de interés, fundamentalmente, las máquinas con ciclo de absorción y de adsorción; en estas máquinas la energía externa que *necesariamente debe aportarse* al ciclo *no es trabajo* proveniente de una fuente eléctrica, es: calor directamente suministrado por un ciclo de cogeneración, calor residual de cualquier proceso industrial y, actualmente, en mayor número, de *la energía captada en colectores solares*. Es recomendable para:

- Uso Residencial
  - edificios *sin,* o intermitente*, suministro eléctrico*; en suelo no urbano
  - edificios servidos desde centrales urbanas de producción térmica

- Uso No Residencial
  - edificios de uso industrial donde se disponga de calor residual como resultado de procesos de: cogeneración, trigeneración…

7.1. Máquina frigorífica de Absorción

Los ciclos de absorción se fundamentan en la capacidad de algunos líquidos, *agua*, y algunas sales, *bromuro de litio*, de absorber vapores de sustancias como el amoniaco y el agua.

El par refrigerante-absorbente: amoniaco-agua es más eficiente y económico -en inversión y consumo- que el par agua-bromuro de litio. Éste es más seguro, no tiene el riesgo de toxicidad –mortalidad, en ambientes cerrados - que tiene el primero. Por ello, habitualmente:

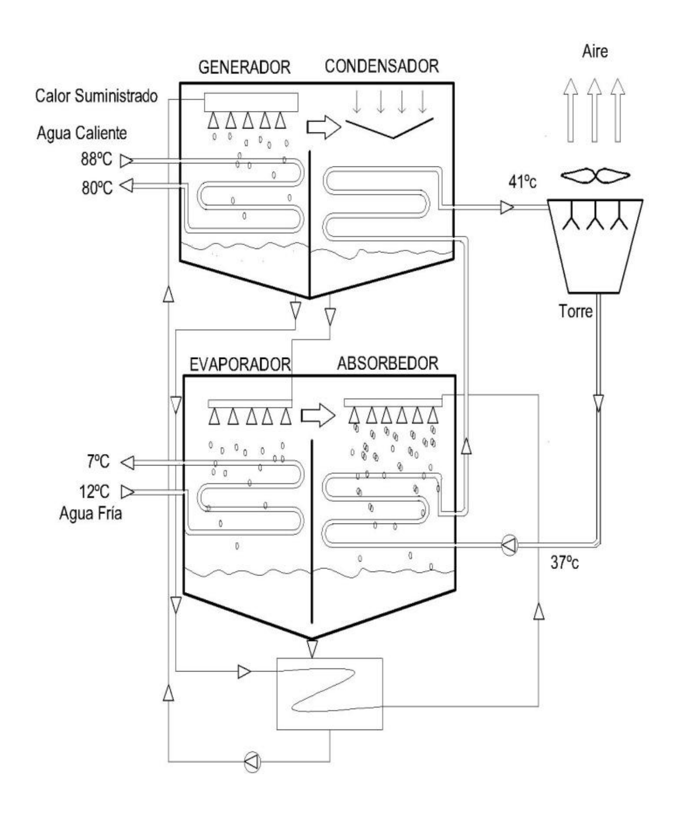
- en climatización: agua/bromuro de litio (refrigerante/absorbente)
- en refrigeración industrial: amoníaco/agua (refrigerante/absorbente)

Las máquinas de absorción producen agua fría consumiendo calor; realizan dos ciclos simultáneos:

- un ciclo *interno*, *de absorción*, con cambio de fase.
- un ciclo *externo*, *térmico*, con únicamente cambio de temperatura.

La máquina de absorción no tiene ciclo inverso: no hay bombas de calor de absorción.

El diagrama que sigue - de partes de una máquina agua/bromuro de litio- esquematiza el conjunto de componentes, pero no visualiza la masividad y hermeticidad que requieren estas máquinas que trabajan con presiones 100 veces por debajo de la atmosférica. Es recomendable que se conozcan y comparen las características de volumen y peso –de las máquinas a compresión y de absorción- según catálogos de fabricante.



- PARA EL CICLO DE ABSORCIÓN
  - Generador
  - Condensador
  - Evaporador
  - Absorbedor
- PARA EL CICLO EXTERNO
  - Intercambiadores
  - torre de enfriamiento o sumidero de calor

La máquina comienza su operación *-en ciclo cerrado-* cuando recibe calor en el GENERADOR donde la presión interior es del orden de 13 kPa:

1. En el GENERADOR, una fina ducha líquida de Agua-BrLi es calentada por un intercambiador por el que circula un fluido a más de 80 ºC. Al calentar la mezcla, el agua se evapora y el BrLi se concentra. El vapor de agua separado pasa al:

2. CONDENSADOR, aquí el vapor de agua se condensa calentando el agua que circula por un serpentín a ≅ 36ºC y se deposita en forma líquida. Este condensado pasa al:

3. EVAPORADOR, aquí la presión es del orden de 0,9 kPa y el agua, a esta presión, entra en ebullición a 3ºC. El calor necesario para que entre en ebullición y se evapore se lo proporciona un serpentín por el que circula AF a temperatura de suministro urbano, necesariamente este AF será enfriada hasta los 6-7ºC. El vapor producido pasa al:

4. ABSORBEDOR, donde una ducha nebulizada de BrLi concentrado -proveniente del generador- absorbe el vapor de agua y, la mezcla, enfriada por un serpentín por el que circula agua a 37ºC se condensa y deposita en su fondo, desde donde será bombeado al generador para comenzar el ciclo cerrado.

5. El agua que fluye por el serpentín del ABSORBEDOR pasa al serpentín del CONDENSADOR en un CICLO EXTERNO que es completado por una necesaria torre de enfriamiento que permite mantener recirculando -y controlada sanitariamente- el agua de enfriamiento.

Las máquinas de absorción son de mayor tamaño y peso que las de compresión. Estas máquinas tienen un EER= 0,6-0,7 (frío producido/energía consumida) y funcionan con agua caliente a partir de 80 ºC. El tipo de captadores solares óptimos son los planos selectivos, de concentrador (CPC) o de vacío.

7.2. Máquina frigorífica de Adsorción

En los sistemas de adsorción se produce la fijación de átomos, iones o moléculas de un fluido vaporizado a la superficie de un sólido (adsorbente). En climatización el adsorbente más utilizado es el *gel de sílice*, se utiliza preferentemente: agua/sílica gel en la función de refrigerante/adsorbente. Estos sistemas se basan en el secado del aire a climatizar: primero se seca -elimina su humedad *por adsorción*- y después se evapora agua en el aire, anteriormente secado, provocando su enfriamiento. Tratan, así, por separado la carga latente y sensible, hecho que permite un control muy preciso de las condiciones de confort.

El ciclo es intermitente. Se suceden, necesariamente, ciclos de carga y descarga del material adsorbente (humectación-desecación del gel de sílice) por lo que es habitual duplicar la estructura del ciclo en las máquinas para que siempre una mitad trabaje enfriando agua, mientras la otra se regenera.

Una consecuencia muy interesante de su ciclo intermitente es la propiedad de *inercia térmica* que se asocia a estas máquinas: una vez regenerada la sílica gel se puede tener en funcionamiento la máquina, sin suministro de energía, hasta que la sílica se sature de nuevo. Esta característica puede ser interpretada como un almacenamiento de frío (J/m3) que nos permite un importante tiempo de desfase entre producción y consumo.

El hecho de que -la regeneración de la silica gel, para devolver al material su capacidad desecante- requiera de fuentes de calor a temperatura baja, entre 45 y 60 ºC, la hace especialmente atractiva para su uso en edificación con utilización de energía solar para regenerar el equipo.

El **EER** de estas máquinas se encuentra entre 0,55 – 0,65 y las potencias disponibles en el mercado oscilan entre 5-150 kW. Si las comparamos con las de absorción, antes comentadas, será relevante tener en cuenta que:

- Para absorción, con temperaturas de entrada de agua caliente por encima de los 80ºC, el tipo de captadores óptimos son los planos selectivos, de vacío o de concentrador (CPC).
- Sin embargo, las de adsorción trabajando sobre los 60ºC pueden aprovechar energías de peor calidad y asociarse a colectores planos; aunque con la desventaja de un menor rendimiento; del orden del 20% menor.

7.3. Máquina frigorífica de Eyección

Las máquinas de eyección -menos utilizadas- al igual que las de absorción y adsorción, pueden utilizar diferentes fuentes de calor como energía externa aportada al ciclo. En este caso en vez de utilizar un compresor mecánico, como las de compresión, utilizan un compresor de chorro de vapor producido por una fuente de calor (usualmente entre 55-75ºC) externa al ciclo e incluida en la máquina.

8. FLUIDOS REFRIGERANTES EN SISTEMAS FRIGORÍFICOS

Los refrigerantes son los fluidos de trabajo de las máquinas frigoríficas.

Para las máquinas a compresión se eligen fluidos que *son líquidos* a presión atmosférica, con temperatura de evaporación entre -20 y -30 ºC y que, *en estado gaseoso*, su temperatura de condensación está ligeramente por encima de las máximas climáticas (entre 40-50ºC) sin que su presión sea excesivamente alta (menor de 10 bar). Los más usados son:

- Fluorados: CFC's (clorofluorcarbonados), HCFC's (hidro…), PFC's (solo fluor y carbono…), HFC's (hidro...) y HC (solo hidro y carbono)
- Hidrogenados: Amoniaco, etano, propano, butano.

Desde el punto de vista de la seguridad:

- Los refrigerantes fluorados son mezclas zeotrópicas[8] de sustancias que presentan muy baja toxicidad y muy baja inflamabilidad por lo que -a pesar de su elevado coste de fabricación y conservación- se han hecho imprescindibles en aplicaciones residenciales y/o de servicio público. Las posibles fugas no generan peligros excesivos a personas ni a alimentos.
- Los hidrogenados -muy eficientes y de muy bajo coste- son, sin embargo, muy tóxicos e inflamables; se utilizan en la industria y raramente en edificación.

Desde el punto de vista medioambiental se comportan justamente al contrario:

- Los hidrogenados tienen índices GWP[9] y TEWI[10] muy bajos y bajos; y un ODP[11] nulo.
- Los fluorados -y sobre todo los compuestos que contienen cloro- tienen un muy alto índice ODP y altos índices GWP y TEWI.

[8] Mezclas en las que la composición de cada componente es la misma en cada una de las fases coexistentes.
[9] GWP, *global warming potencial* o calentamiento global (patrón CO_2= 1).
[10] TEWI, *total equivalent warming impact* o contribución total al efecto invernadero y destrucción de O_3.
[11] ODP, *ozone depletion potencial* o destrucción de la capa de ozono (patrón R11=1).

En resumen, los fluorados prestan un excelente rendimiento en aplicaciones donde esté involucrada la seguridad de las personas, con un pésimo comportamiento medioambiental. Los hidrogenados pueden ser de excesivo riesgo en las instalaciones de servicio a personas, aunque prácticamente inocuos respecto al medio ambiente.

9. SISTEMAS FRIGORÍFICOS

El creciente uso de las máquinas refrigerantes de expansión directa en la edificación, con grandes cantidades de refrigerante circulando por recintos interiores, hace que una posible fuga sea indirectamente letal para los ocupantes. La normativa introduce el concepto de ***sistema frigorífico*** para establecer cómo deben de ser las instalaciones de producción de frío según dónde se quieran instalar y qué cantidad de refrigerante máximo pueden contener para evitar riesgos excesivos para la seguridad de las personas y del medio ambiente.

Debiendo entender como sistemas frigoríficos*: "tanto la máquina frigorífica expresamente vinculada a una instalación específica como las instalaciones complementarias necesarias para cumplir su función; y, más importante, la cantidad y tipo de refrigerante que utiliza".* Y hace énfasis en "*…más importante*": ***por el riesgo personal y medioambiental que una fuga de refrigerante tiene asociado.***

9.1. Riesgos de los sistemas frigoríficos (en edificación)

Las máquinas frigoríficas son genéricas, su estudio no tiene en cuenta el uso específico que pueden tener. Dos máquinas que tengan la misma potencia, desempeñen la misma función y cumplan los mismos objetivos, pueden resultar radicalmente diferentes una de otra, en cuanto a su tamaño, construcción y disposición. Por tanto, sabemos que la instalación de climatización impondrá condiciones espaciales y constructivas -en el interior y en el exterior del edificio- de mayor o menor importancia según el sistema frigorífico elegido para servirla.

En edificación se tendrá necesidad de considerar sistemas frigoríficos en: instalaciones de climatización, conservación de alimentos (superficies comerciales), refrigeración de las salas de quirófanos, refrigeración de laboratorios… En todos ellos deberemos especificar detalladamente cómo es la *máquina frigorífica*: sus elementos, dónde se encuentra cada uno de ellos y el refrigerante (tipo y cantidad) que utiliza, para -de acuerdo a la norma EN 378: 2011-:

- **evitar el daño -asfixia, envenenamiento o quemado- de personas**
- **evitar la destrucción del ozono atmosférico**
- **evitar el calentamiento global terrestre**

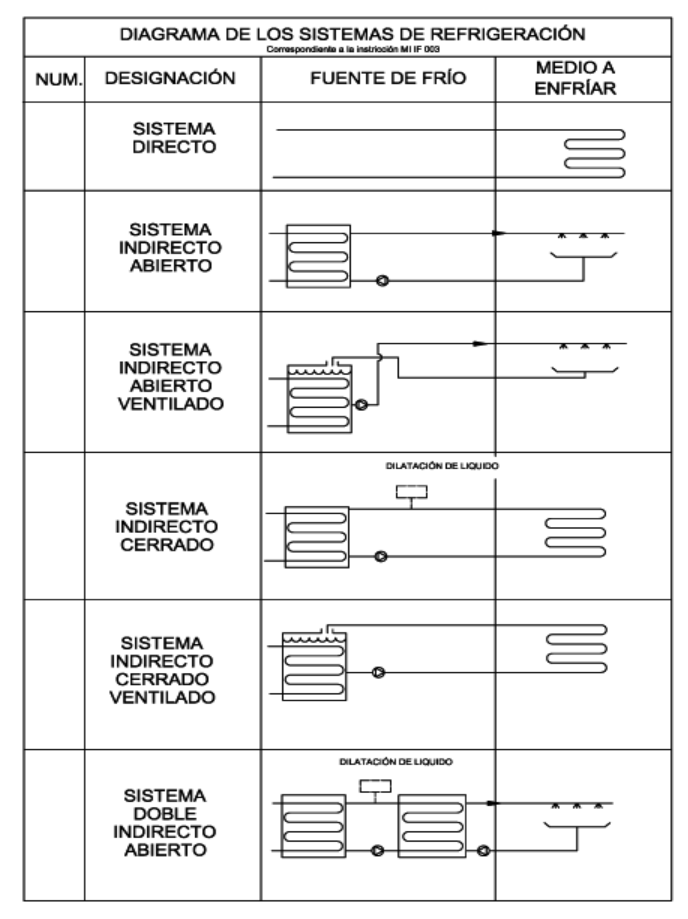
9.2. Clasificación de los refrigerantes por seguridad personal

Para *clasificar los sistemas frigoríficos* y fijar un *límite práctico* de cantidad de refrigerante en el sistema, se tendrá en cuenta:

- El grupo de seguridad al que pertenece el refrigerante que emplea el sistema:
  - cinco grupos de riesgo combinando: toxicidad (A y B) e inflamabilidad (1, 2, 3)
  - los grupos van de A1 (no tóxico ni inflamable) hasta B3 muy tóxico e inflamable

- La ocupación por personas de los recintos a los que sirve el sistema en clasificación:
  - tres categorías: A (permanentemente ocupado), B, C (raramente ocupado).

- La posibilidad de que una fuga en el intercambiador ponga refrigerante en el recinto:



  - *Sistema Directo o Indirecto*: según el evaporador o el condensador del sistema de refrigeración está en contacto directo, o no, con el medio a enfriar o calentar.
  - *Sistema Abierto o Cerrado*: si el contacto con el ambiente es por intermedio de un fluido primariamente refrigerado.

- La posibilidad de que una fuga en cualquier parte de la máquina ponga refrigerante en el recinto : algún otro componente distinto del intercambiador en el interior.

9.3. Clasificación de los refrigerantes por seguridad medioambiental

El cálculo del impacto total equivalente de calentamiento es de particular importancia en la etapa de diseño o cuando se toman decisiones de rehabilitación. El factor **TEWI** puede calcularse por la siguiente ecuación:

$$TEWI = [GWP \cdot L \cdot n] + [GWP \cdot m\ (1 - \alpha_{recuperación})] + [n \cdot E_{anual} \cdot \beta]$$

- Impacto debido a pérdidas por fugas: $GWP \cdot L \cdot n$
- Impacto por pérdidas producidas en la recuperación: $GWP \cdot m \cdot (1 - \alpha_{recuperación})$
- Impacto debido a la energía consumida: $n \cdot E_{anual} \cdot \beta$
- **TEWI** impacto total equivalente sobre el calentamiento global, en kilogramos de CO_2
- **GWP** potencial de calentamiento global, referido a CO_2;
- **L** son las fugas, expresadas en kilogramos por año;
- **n** es el tiempo de funcionamiento del sistema, en años;
- **m** es la carga del refrigerante, en kilogramos;
- $\alpha_{recuper}$ es el factor de recuperación, de 0 a 1;
- E_{anual} es el consumo energético, en kilovatio-hora por año;
- **β** es la emisión de CO_2, en kilogramos por kilovatio-hora.

GWP es un índice que describe las características radioactivas de los gases de efecto invernadero bien mezclados, que representa los efectos combinados de los diferentes tiempos que estos gases permanecen en la atmósfera y su eficacia relativa en la adsorción infrarroja saliente. Este índice aproxima el efecto de calentamiento, integrado en el tiempo, de un gas de efecto invernadero en la atmósfera actual, en relación al CO_2 y se basa en un horizonte de tiempo de integración acordado de 100 años.

El factor de conversión **β** expresa la cantidad de CO_2 producido por la generación de 1 kWh. Puede variar geográficamente de forma considerable y en términos de tiempo.

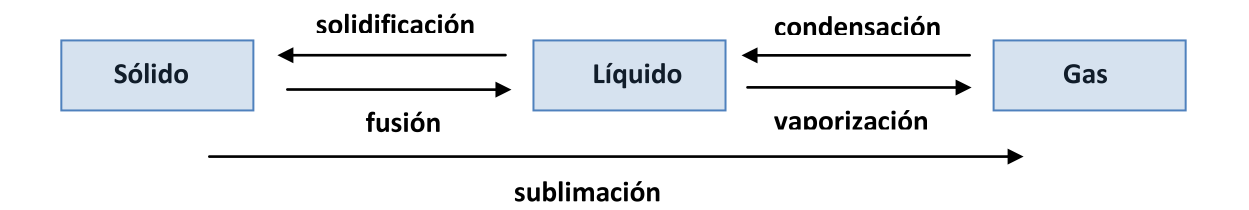
Adicionalmente, cuando puedan emitirse gases de efecto invernadero por causa del aislamiento u otros componentes del sistema, se añade el potencial del calentamiento global de tales gases: $GWP_i \times m_i (1 - \alpha_i)$

- GWP_i es el potencial del calentamiento global del gas contenido en el aislamiento,
- m_i es la carga de gas existente en aislamiento del sistema, en kilogramos;
- α_i es el índice de gas recuperado del aislamiento al final de la vida del sistema, varía de 0 a 1.

Cuando se calcula el **TEWI** es muy importante actualizar los **GWP** relativos al CO_2 y la emisión de CO_2 por kilovatio-hora partiendo de los valores más recientes.

10. ANEXO A: TERMODINÁMICA

La materia se presenta en la naturaleza en tres estados: sólido, líquido y gas; y cada sustancia en un solo estado -su estado natural- con excepciones notables como el agua que se encuentra en los tres estados. Sin embargo es posible modificar cualquier sustancia desde su estado natural a cualquiera de los otros dos, sin más que aportarle o retirarle energía. Así, se puede transformar cualquier sustancia mediante los procesos de:



En estado natural, todas las sustancias tienden al equilibrio con su entorno; esta condición de equilibrio exige la definición de un límite o frontera entre sustancias. Utilizamos el concepto de *sistema termodinámico* para especificar una porción del espacio material –espacio ocupado por una substancia material homogénea que esté limitado por una frontera cerrada– que puede ser caracterizado por sus propiedades intrínsecas *extensivas (energía interna, entropía, volumen o composición molar)* y/o por sus propiedades *puntuales (presión, temperatura y potencial químico)* sin necesidad de referencias a condiciones externas presentes o pasadas.

Los sistemas serán *aislados* si a través de su frontera no se intercambia energía o materia; *cerrados* si se intercambia solo energía (calor y/o trabajo); *abiertos* si se intercambia energía y materia. Estarán en *estado de equilibrio* cuando no sufran, en el tiempo, cambios espontáneos; y pasan de un estado de equilibrio a otro cuando experimentan un *proceso termodinámico*, proceso en el que cambia el valor de sus propiedades características.

Obviamente en los *sistemas termodinámicos* podemos incluir porciones, tanto de sólidos como de fluidos y de gases, y la **Termodinámica** *estudia tanto los estados de equilibrio macroscópico como los procesos de intercambio de energía y materia que se producen entre dichos sistemas o entre sistemas y el ambiente exterior.*

De acuerdo a lo anterior, el nivel energético de un sistema termodinámico *en estado sólido* está especificado por su temperatura, no así *en los fluidos* donde necesitamos conocer: su energía interna: **u**, su presión: **p**, su volumen, **V**, y su temperatura, **T**, para determinarlos. En consecuencia, los procesos energéticos que experimenta un sólido se pueden calcular en función, única y exclusivamente, de la variación de *temperatura* entre el estado inicial y final del proceso; sin embargo, para los fluidos, no solo será necesario conocer la *temperatura* sino también su *energía interna,* el *volumen* que ocupe y la *presión* que ejerza contra su frontera con el exterior.

Los líquidos -para nuestro propósito- se consideran incompresibles y el volumen no varía con la presión; no, así, en los gases donde la relación entre volumen y presión debe cumplir las leyes de:

- Mariotte (a temperatura constante) relación entre presión y volumen:

  $\boldsymbol{p.V = cte}$

- Gay-Lussac (a presión constante) relación entre volumen y temperatura:

  $\boldsymbol{V_t = V_0\,(T/T_0)}$ $\qquad$ $\boldsymbol{V_0 = V_{273}\ ;\ T=(t+273)K\ ;\ t(ºC)\ ;\ T_0=273\ K}$

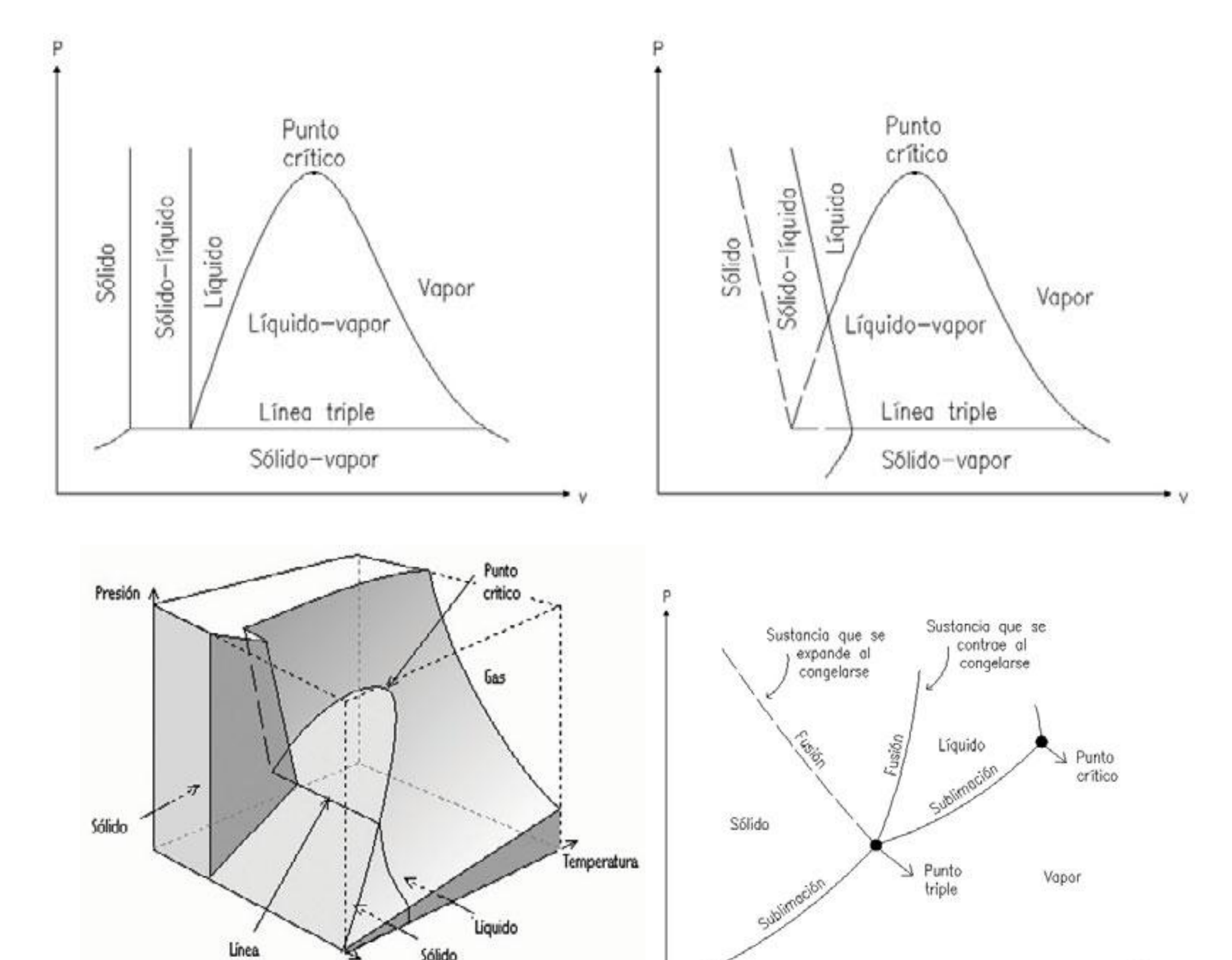
- Charles(a volumen constante) relación entre presión y temperatura:

  $\boldsymbol{p_T = p_0\,(T/T_0)}$ $\qquad$ $\boldsymbol{p_0 = p_{273}\ ;\ T=(t+273)K\ ;\ t(ºC)\ ;\ T_0=273\ K}$

- Gas ideal o perfecto (cumpliendo las leyes de Mariotte, Gay-Lussac y Charles) relaciona todas las variables del gas, según:

  $\boldsymbol{p \cdot V = n \cdot R \cdot T}$

Habitualmente, para mostrar los estados de equilibrio que puede alcanzar un sistema, utilizamos los diagramas termodinámicos, que especifican los valores posibles que pueden tomar sus propiedades.

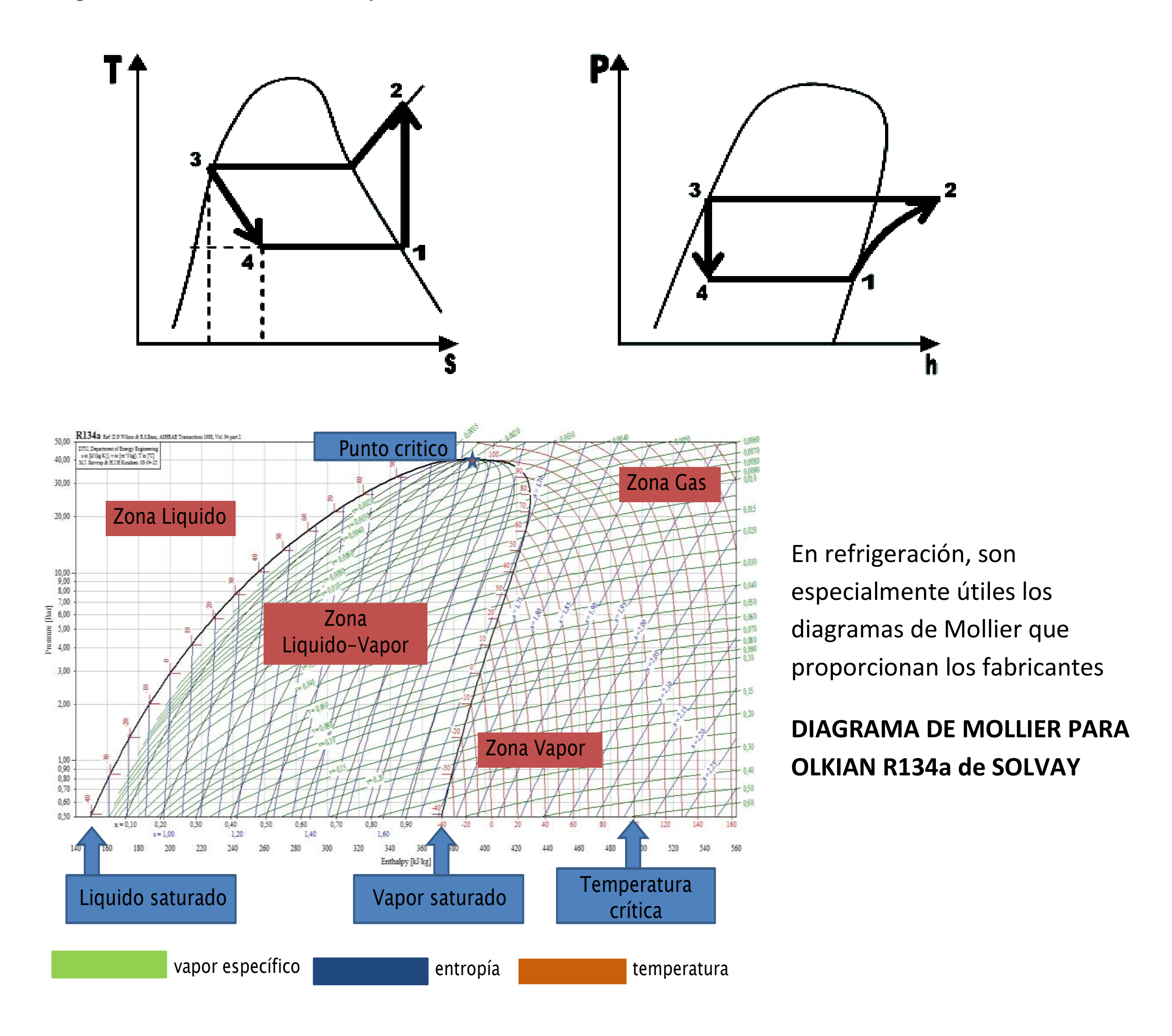


10.1 Procesos y ciclos termodinámicos

Los *procesos termodinámicos* se realizan mediante la transferencia de calor y/o la realización de trabajo; es relevante recordar que los sistemas contienen *energía* pero no contienen *calor o trabajo; calor y trabajo* son energías en tránsito que se manifiestan únicamente cuando se está produciendo un cambio de estado de equilibrio.

Los procesos termodinámicos son especialmente interesantes en fluidos, cuando, tras sucesivos cambios, *todas las variables relevantes del sistema -propiedades- vuelven a tomar sus valores iniciales.* Entonces, el sistema habrá desarrollando un *ciclo termodinámico.*

Los *ciclos termodinámicos* -los diferentes estados por los que pasa un fluido a lo largo de un ciclo- se pueden representar en función de dos variables, o propiedades termodinámicas, que según se elijan dan lugar a distintos *diagramas termodinámicos*. Y, así, recordaremos haber estudiado *ciclos* de Carnot, de Rankine,…representados en *diagramas* de Mollier, entálpicos, etc.



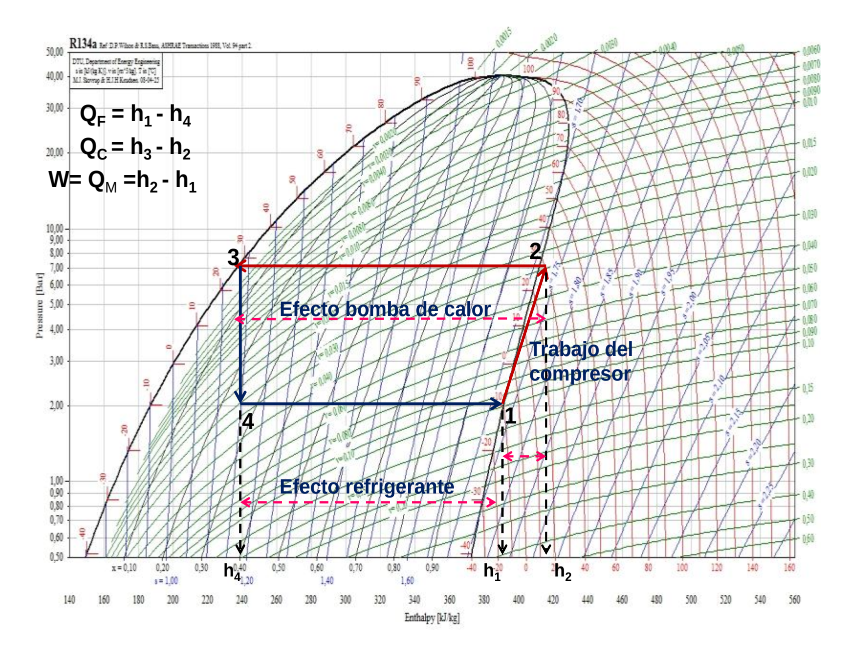
En refrigeración, son especialmente útiles los diagramas de Mollier que proporcionan los fabricantes

DIAGRAMA DE MOLLIER PARA OLKIAN R134a de SOLVAY

10.2 Ciclo de refrigeración

El ciclo de refrigeración es el fundamento teórico para el diseño, cálculo, construcción y montaje de la industria frigorífica y, en lo que nos interesa, para las instalaciones de acondicionamiento térmico del ambiente interior de los edificios.

Es impensable entender cómo se puede comportar un edificio si no sabemos, al menos, por qué y cómo se enfría un recinto interior; y es impensable aproximarse a la instalación de climatización sin entender cómo se "produce" un ciclo de refrigeración.



El ciclo de refrigeración, de los innumerables ciclos posibles, se ejecuta siempre en cuatro procesos o etapas:

- Compresión isentrópica *1-2*
- Condensación isotérmica *2-3*
- Expansión isentrópica *3-4*
- Expansión isotérmica *4-1*

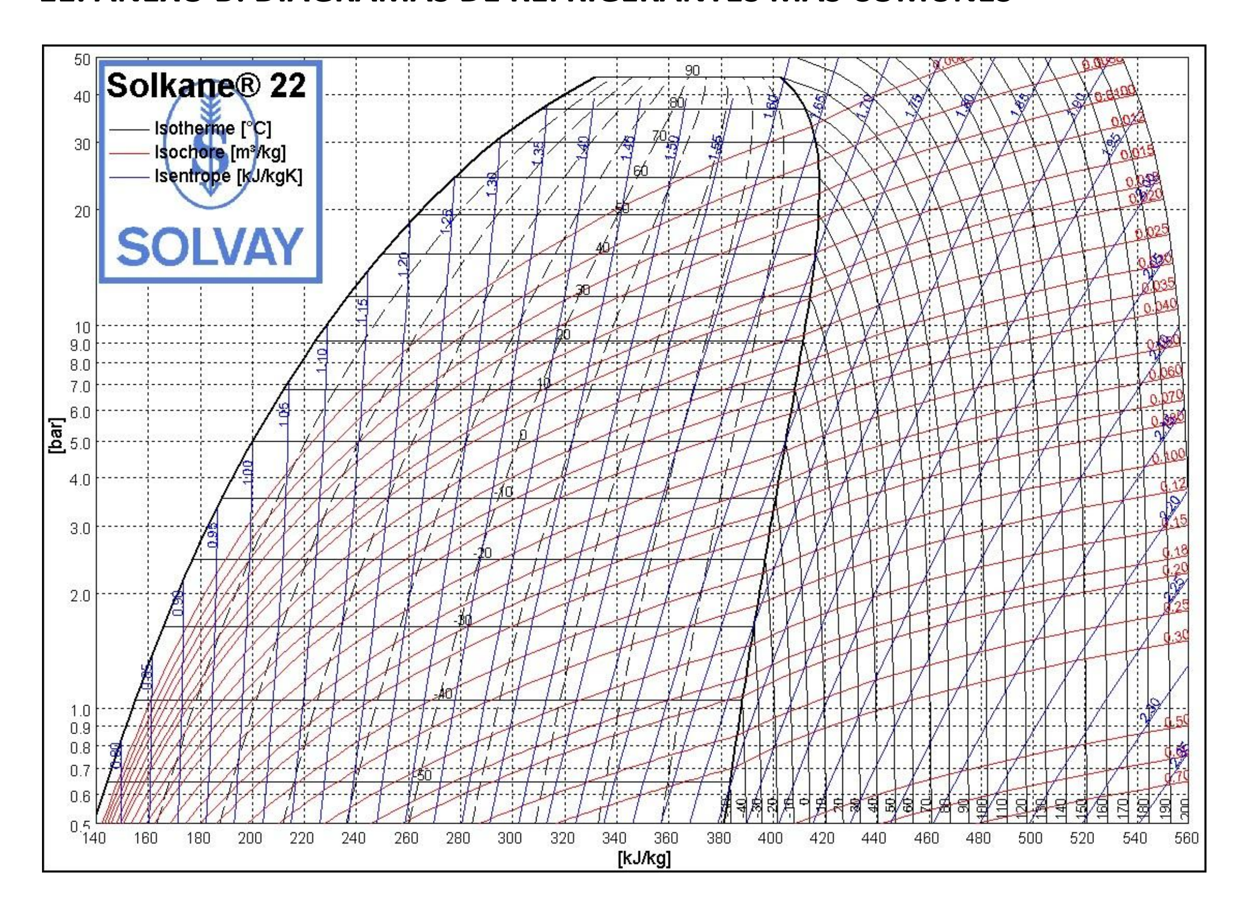
La utilización de los diagramas de Mollier permite la valoración rápida y sencilla de los balances de energía involucrados; así, en el ciclo anterior, la energía específica en cada etapa será:

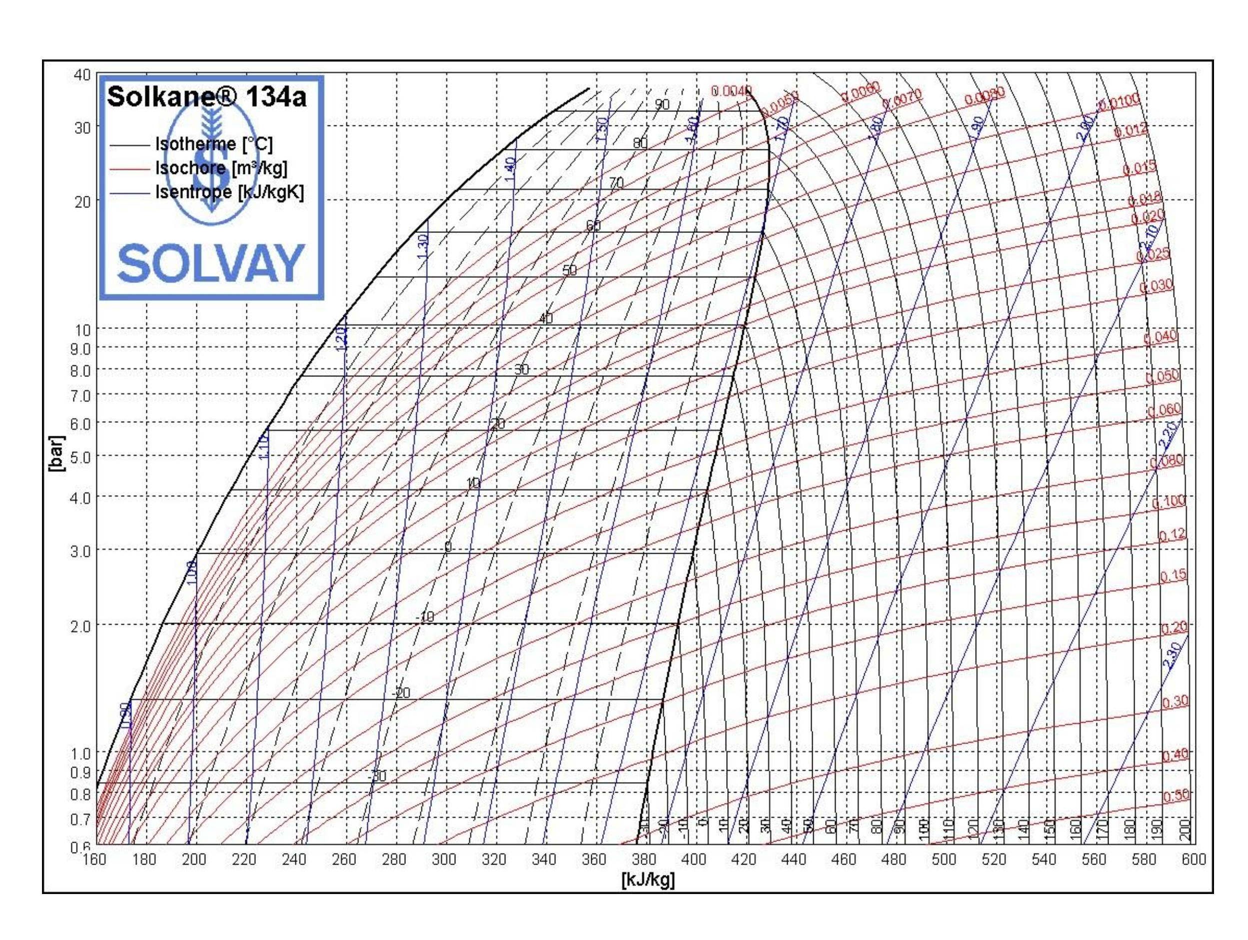
- *1-2*: trabajo efectuado sobre el refrigerante para modificar su estado: $\mathbf{h_2 - h_1}$
- *2-3*: energía cedida por el sistema al ambiente exterior, *foco caliente:* $\mathbf{h_3 - h_2}$
- *3-4:* cambio de estado sin variación de energía, a temperatura constante.
- *4-1*: energía tomada por el sistema del ambiente interior, *foco frío:* $\mathbf{h_1 - h_4}$

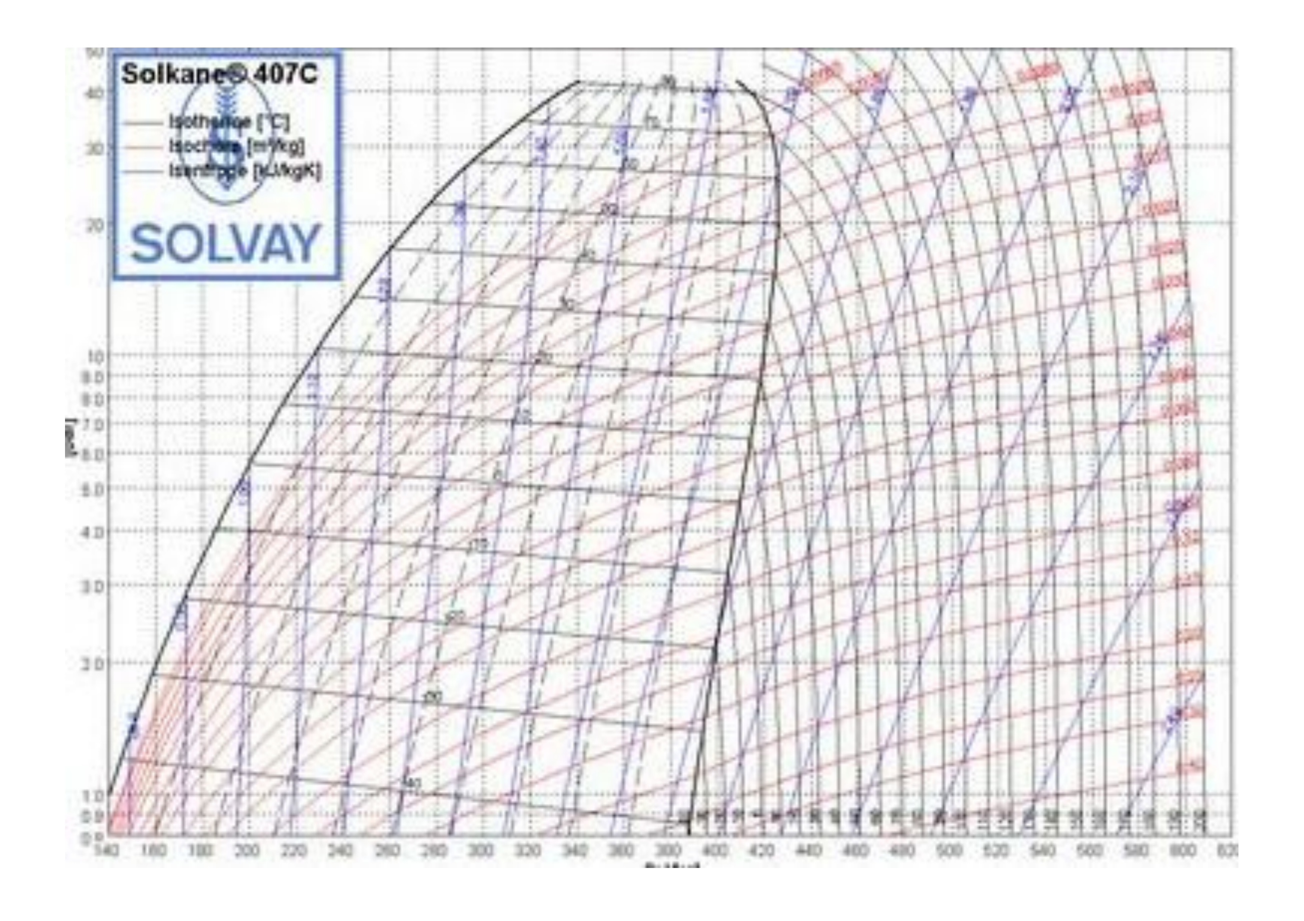
Es necesario no perder de vista que los intercambios de energía que se realizan entre el sistema y su entorno -durante la condensación y la evaporación- se hacen, siempre, entre un único sistema: el refrigerante y, al menos, necesariamente dos separados ambientes (interior de un local-exterior del local)… *¡no tendría ningún sentido ni utilidad condensar y evaporar en un mismo, y único, recinto!*

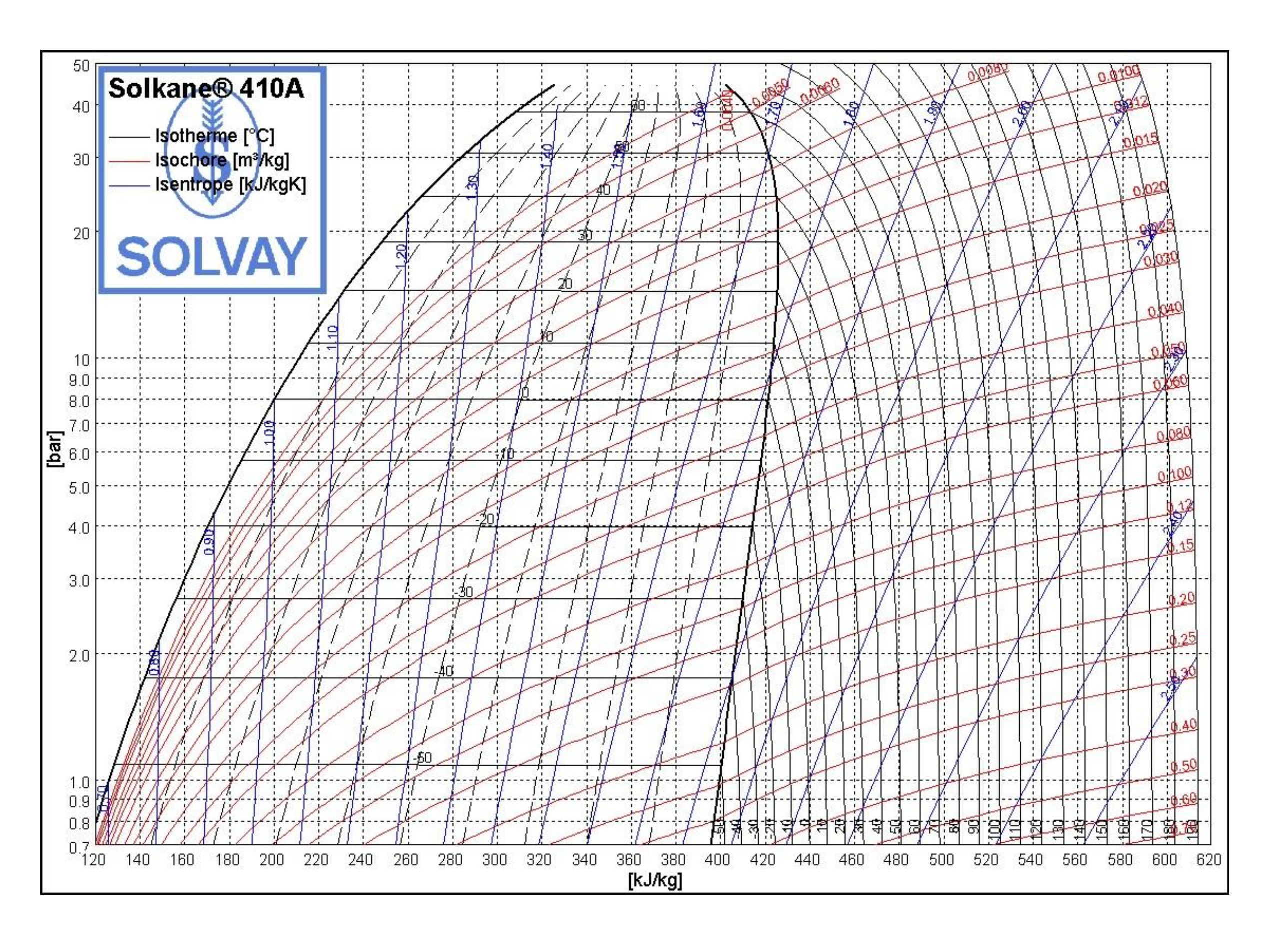
El frío en climatización, de acuerdo con lo expuesto, es la extracción continua de energía del ambiente durante la evaporación de un fluido refrigerante que continuamente es transportado por una ***máquina frigorífica*** a otro ambiente.

11. ANEXO B: DIAGRAMAS DE REFRIGERANTES MÁS COMUNES






Solkane® 407C
Isotherme [°C]
Isochore [m³/kg]
Isentrope [kJ/kgK]
SOLVAY


Solkane® 410A
Isotherme [°C]
Isochore [m³/kg]
Isentrope [kJ/kgK]
SOLVAY
[bar]
[kJ/kg]
50
40
30
20
10
9.0
8.0
7.0
6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0.9
0.8
0.7
120 140 160 180 200 220 240 260 280 300 320 340 360 380 400 420 440 460 480 500 520 540 560 580 600 620

NOTAS

NOTAS

NOTAS

CUADERNO



Cuadernos.ijh@gmail.com
info@mairea-libros.com

